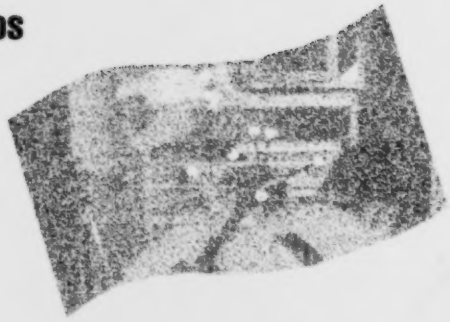
ÉTUDES ET RECHERCHES

Évaluation de la contrainte au dos en milieu de travail

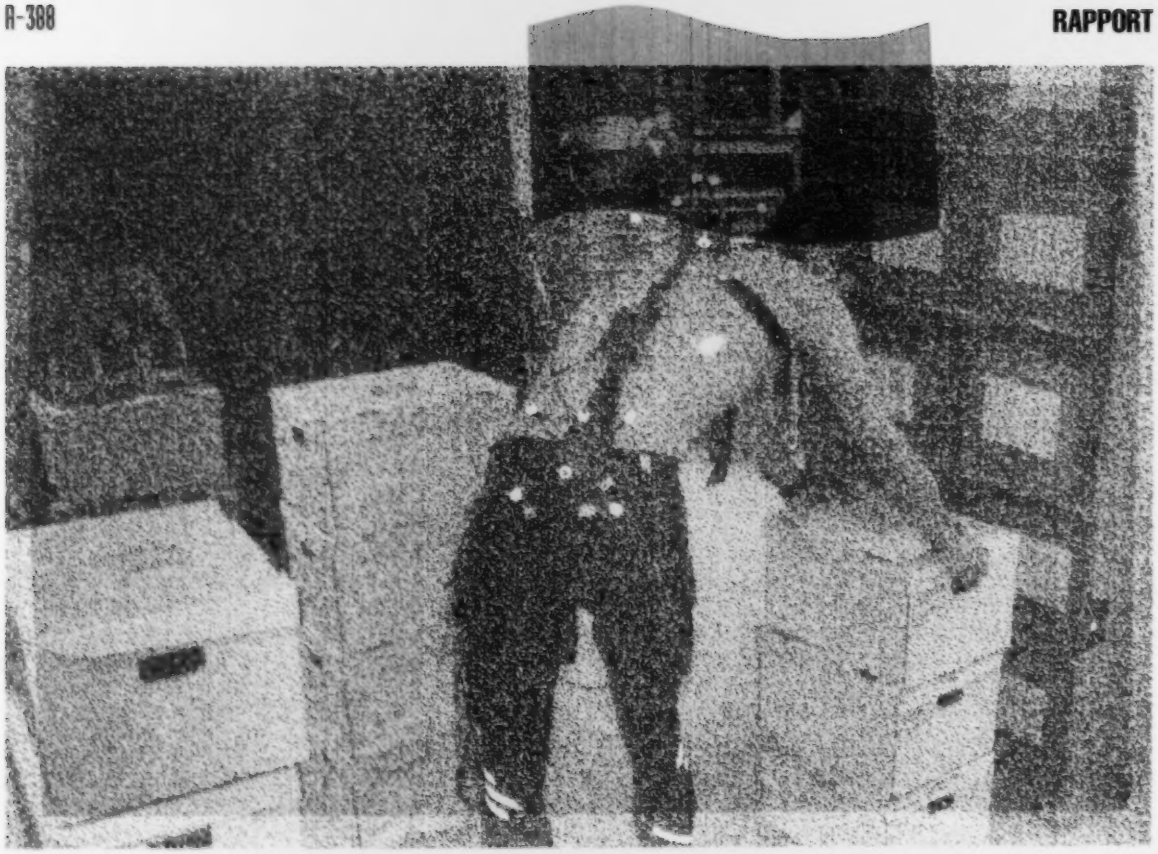
Développement préliminaire d'une méthode visant à déterminer la cinématique tridimensionnelle du corps humain à l'aide d'un minimum de caméras vidéo



Alain Delisle
André Plamondon
Pierre Desjardins
Érik Salazar
Denis Gagnon
Christian Larivière

R-388

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES
travaillent pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2004

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, novembre 2004

105-06390/

Évaluation de la contrainte au dos en milieu de travail

Développement préliminaire d'une méthode visant à déterminer la cinématique tridimensionnelle du corps humain à l'aide d'un minimum de caméras vidéo

Alain Delisle[1], André Plamondon[1], Pierre Desjardins[2], Érik Salazar[1], Denis Gagnon[3] et Christian Larivière[1]

[1]Sécurité-ergonomie, IRSST
[2]Consultant
[3]Université de Sherbrooke

ÉTUDES ET RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Le besoin de mesurer quantitativement le chargement mécanique qui contribuerait aux affections vertébrales en milieu de travail est un prérequis essentiel à l'évaluation des risques de lésions. Parmi les outils disponibles utiles à mesurer ces charges, on retrouve la vidéo qui permet de reconstruire des marqueurs sur des sujets à partir de plusieurs caméras, ce qui est rarement possible en milieu de travail. Pour rendre cette technique plus attrayante, il faut faciliter le mode d'acquisition tridimensionnelle (3D) en réduisant le nombre de caméras à une seule. L'objectif principal du présent projet était donc d'explorer la faisabilité de n'utiliser qu'une seule caméra vidéo pour la reconstruction 3D de marqueurs. Plus spécifiquement, il s'agissait tout d'abord d'établir le niveau d'erreur réalisé lors de la reconstruction 3D de marqueurs pour ensuite déterminer l'impact de cette erreur sur l'orientation relative de segments.

Les résultats de l'étude ont clairement démontré la faisabilité de l'utilisation d'une seule caméra vidéo pour déterminer la position tridimensionnelle d'un ensemble de repères organisé dans l'espace. Le niveau de précision observé sur les angles articulaires (5°) avec cette approche est suffisant pour justifier une utilisation à des fins d'analyse de posture du corps humain de manière tridimensionnelle. Ce type d'information pourrait être très utile pour déterminer les risques de blessures au dos lors de tâche en milieu de travail.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la collaboration de plusieurs personnes. Nous voudrions particulièrement remercier Antoine Dagenais pour son aide à la collecte et à la numérisation des données. Nous tenons également à remercier Katia Marcil pour ses commentaires constructifs qui ont contribué à améliorer l'interface vidéo. Nous sommes également reconnaissants envers Henri Scory du programme Services et expertises de laboratoire pour son apport dans l'élaboration de l'interface vidéo. Enfin, nous remercions Christine Lecours du programme sécurité-ergonomie qui a contribué à la rédaction de ce rapport.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i

REMERCIEMENTS iii

1 INTRODUCTION 1

2 LES OBJECTIFS 3

3 DÉVELOPPEMENT DE L'INTERFACE VIDÉO 5

4 LE CALIBRAGE DE LA CAMÉRA 7

5 LA RECONSTRUCTION 3D D'UN CORPS RIGIDE À PARTIR D'UNE SEULE VUE CAMÉRA 11
5.1 Description de la méthode utilisée 11
5.1.1 Le système d'équations 12
5.1.2 La méthode utilisée pour déterminer l'estimation initiale 13
5.1.3 Le problème de quatre points (P4P) 14
5.1.4 Implantation de la démarche 15
5.2 Procédure de vérification de la méthode proposée 18
5.3 Résultats et discussion 19

6 INTÉGRATION DES ALGORITHMES DE GESTION DES DONNÉES MANQUANTES 23

7 APPLICATION À LA RECONSTRUCTION DE PLUSIEURS CORPS RIGIDES RELIÉS PAR DES ARTICULATIONS 27

8 DISCUSSION GÉNÉRALE 33

9 CONCLUSION 35

10 RÉFÉRENCES 36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Les degrés de liberté du modèle de la caméra 8
Tableau 2 Erreur (m) quadratique (RMS) et écart maximal de reconstruction du corps rigide selon les axes, ainsi que la valeur du 95^{e} centile de la distribution des écarts 19
Tableau 3 Résultats du processus de numérisation exploitant les algorithmes d'interpolation 25
Tableau 4 Erreur moyenne (m) pour chaque axe, écart maximal sur l'axe Zc (m) et durée pour effectuer la numérisation manuelle en comparaison avec la numérisation assistée 25
Tableau 5 Nombre de repères pouvant être numérisés et nombre de repères d'Optotrak pour chaque segment du système articulé 28
Tableau 6 Définitions cliniques des angles selon le référentiel articulaire utilisé 29
Tableau 7 L'erreur moyenne et l'écart maximal (°) entre l'approche vidéo à une caméra et la méthode optoélectronique de référence sur les différents angles articulaires des trois articulations du système étudié de même que l'étendue du mouvement articulaire déterminée selon chaque approche 30
Tableau 8 Valeurs moyennes, médiane, du 95^{e} centile et maximale de la distance (°) entre les quaternions déterminés par l'approche vidéo et la méthode optoélectronique de référence pour chaque articulation 30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Le système utilisé pour le calibrage de la caméra avec le panneau muni du carrelage dans sa position la plus rapprochée de la caméra. L'espace entier calibré est délimité par les quatre DELs sur la structure d'aluminium (A1, ..., A4) et par les quatre DELs sur le panneau mobile (M1, ..., M4) alors qu'il est à la position la plus éloignée de la caméra. La zone où toutes les intersections des carreaux ont été numérisées est délimitée par le pointillé. 8

Figure 2 Représentation des différents référentiels. Le référentiel du laboratoire (X_L, Y_L, Z_L), le référentiel image de la caméra (u,v), et le référentiel de la caméra (Xc,Yc,Zc). Le point nodal (Xc_0,Yc_0,Zc_0) et le point principal (u_0,v_0) sont aussi représentés. 9

Figure 3 Deux rayons (d_i, d_j) formant l'image (I_i, I_j) de deux points (P_i, P_j) d'un objet..... 12

Figure 4 Exemple d'une configuration où plus d'une solution est possible dans le cas de quatre points : les images du tétraèdre formées par les points A,B,C,D et par les points A,B,C,D' sont identiques dans les deux cas (a,b,c,d), les distances entre les 4 points sont identiques dans les deux cas, mais pourtant les coordonnées 3D des points D et D' sont différentes. 14

Figure 5 La figure de gauche illustre une configuration de quatre points (A,B,C,D). Suite à une rotation de l'objet autour de BC, la figure de droite illustre une autre configuration (A',B,C,D') qui ne pourrait être discriminée de la première sur l'image. Encore une fois, l'image des deux configurations de quatre points est la même et les distances entre les points sont les mêmes, bien que les positions spatiales des points A' et D' soient différentes des points A et D. 15

Figure 6 A) Le déplacement des sommets. ABC est la première solution obtenue, $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$. En déplaçant A, nous obtenons deux autres estimations initiales : (1) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$ (A'BC) et (2) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$ (A''BC). De façon similaire, deux autres estimations initiales sont obtenues pour un total de quatre : (3) $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{max}$ et (4) $d_A=L_{med}$, $d_B=_{min}$, $d_C=_{min}$. B) La permutation des d_i. ABC est une solution provenant du déplacement des sommets, $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$. En permutant les valeurs de d_A et de d_B nous obtenons une autre estimation initiale : (1) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{med}$, $d_C=L_{max}$ (A'B'C). Quatre autres estimations initiales sont obtenues de façon similaire pour un total de cinq : (2) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{med}$ (3) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{med}$; (4) $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{min}$ et (5) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{med}$, $d_C=L_{min}$. 16

Figure 7 Représentation de l'ajout d'un quatrième point. ABC est une solution, $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$. $L_{prof} = L_{max} - L_{min}$. Chaque point supplémentaire est ajouté à l'aide de deux estimés initiaux. Ainsi, d_D est estimé comme étant égal à $L_{min} - 2*L_{prof}$ (ABCD') puis comme étant égal à $L_{max} + 2*L_{prof}$ (ABCD''). 17

Figure 8 Le corps rigide utilisé et les six repères à partir desquels sa position et son orientation ont été déterminées. 18

Figure 9 Représentation des erreurs quadratiques (RMS) sur l'axe Z_L (approximativement l'axe optique) en fonction des combinaisons de quatre repères incluant le repère 6 (A), excluant le repère 6 (B) et des combinaisons de cinq repères (C). 21

Figure 10 Illustration des premières étapes du processus de la numérisation assistée, où chaque trait vertical représente une image. Les étapes de numérisation indiquent les images numérisées à cette étape. Les étapes d'interpolation indiquent les images utilisées par les méthodes d'interpolation pour générer les prédictions. 24

Figure 11 Graphiques de la coordonnées Z_L (i.e. le long de l'axe optique) de l'origine du corps rigide telle qu'obtenue par la méthode de numérisation manuelle (A) et par la méthode de numérisation assistée (B) en comparaison à celle obtenue par la méthode de référence ainsi que l'erreur (différence entre les deux méthodes et la référence). 26

Figure 12 Le système articulé avec les repères rétro-réfléchissants et les DELs utilisés pour évaluer l'impact de l'erreur de reconstruction sur les angles relatifs vue de côté (A), et vue en plongée (B). Le système est composé de quatre segments distincts : 1) un segment nommé omoplate, 2) un segment nommé bras, 3) un segment nommé avant-bras et 4) un segment nommé main. Les points X_E, X_C et X_P indiquent la position approximative des centres articulaires de l'épaule, du coude et du poignet, respectivement. 28

Figure 13 Angle de flexion/extension au poignet en fonction du temps calculé à partir de la numérisation assistée d'une vue vidéo et à partir de la méthode optoélectronique de référence de même que la distance entre les quaternions et l'erreur. Un angle positif correspond à une extension du poignet. 31

1 INTRODUCTION

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) et tout particulièrement les affections vertébrales au bas du dos sont un fardeau autant pour la société que pour les personnes qui en sont affectées. Au Québec, près de 35 700 travailleurs ont été indemnisés à cause d'une affection vertébrale survenue au cours de l'année 2000. Pour cette seule année, la CSST a engagé une somme de 426,6 millions de dollars pour ces affections. La recherche de moyens pour prévenir ces affections et en réduire l'impact demeure donc prioritaire. On ne connaît pas exactement la ou les causes des affections vertébrales. Parmi les nombreuses hypothèses soutenues, l'une d'elles suppose que les blessures au dos ont une cause mécanique qui résulte d'une surcharge subite excédant les capacités des tissus ou d'une charge répétée affaiblissant les tissus à long terme. La charge physique dépend de la tâche à accomplir et elle force les tissus à réagir soit en s'adaptant ou en se dégénérant. Il existe un équilibre entre les capacités d'un travailleur et les exigences de son travail et, lorsque cet équilibre est rompu, les risques de lésions sont généralement élevés. La mesure quantitative des charges susceptibles de contribuer aux affections vertébrales est donc un prérequis essentiel à l'évaluation des risques de lésions.

Il existe de nombreux outils pour évaluer les risques de lésions au dos mais jusqu'à récemment, l'estimation du niveau de risque associé aux activités de travail s'appuyait essentiellement sur des évaluations qualitatives. Une récente revue de littérature démontre que, sur une sélection de 25 publications, seulement deux études ont appliqué des techniques de mesure permettant une caractérisation quantitative objective de la charge physique (Kuiper *et al.*, 1999). Les auteurs de cette revue concluent entre autres choses qu'une attention particulière à la mesure précise du niveau de risque devrait être développée. La validation de méthodes quantitatives d'évaluation du risque applicables en milieu de travail constitue une priorité pour un organisme comme le NIOSH (Hsiao *et al.*, 1997) afin d'améliorer les modes d'interventions et de prévention des blessures au dos.

Le problème des méthodes quantitatives d'évaluation des charges physiques tient en particulier de leur complexité d'utilisation en milieu de travail. Par exemple, l'étude de mouvements tridimensionnels (3D) au moyen de caméras vidéo utilise habituellement plusieurs caméras vidéo mathématiquement liées ce qui est difficilement réalisable en milieu de travail. Selon Li et Buckle (1999), un tel outil doit être simple, facile et rapide d'utilisation, en plus d'être flexible pour accommoder différents types de tâches et nécessairement fiable. Par conséquent, pour faciliter le mode d'acquisition 3D il faudrait en réduire le nombre de caméras au point qu'une seule caméra soit nécessaire. Une telle approche faciliterait beaucoup son d'utilisation.

L'analyse quantitative 3D du mouvement humain est récente malgré le fait qu'on s'intéresse à cette problématique depuis longtemps. C'est probablement la publication de la technique du DLT (Direct Linear Transformation) par Abdel-Aziz et Karara (1971) qui poussa à l'avant-scène l'étude 3D du mouvement humain en simplifiant l'algorithme nécessaire à la reconstruction 3D des marqueurs spatiaux. La méthode requiert l'image d'un marqueur à partir d'un minimum de deux caméras vidéo. L'idée de n'utiliser qu'une seule caméra vidéo (ou une image) pour reconstruire en 3D un objet n'est pas nouvelle et on retrouve l'essence d'un algorithme aussi loin qu'en 1841 au tout début de l'aire de la photographie (Grunert,1841; cité par Haralick et al.

1991). Ce n'est toutefois que très récemment que des travaux sur ce sujet ont fait leur apparition dans la littérature consacrée à l'étude du mouvement humain (Ambrosio *et al.*, 2001a; Ambrosio *et al.*, 2001b; Eian et Poppele, 2002). Probablement que la disponibilité des nouvelles caméras vidéo et l'intérêt d'implanter de nouvelles techniques de mesure dans le milieu de travail expliquent cet essor. Toutefois, peu d'études rapportent le niveau d'erreur de ces approches sur des données expérimentale réelles.

Il existe donc de nombreux algorithmes qui, à la base, utilisent les mêmes concepts géométriques mais parviennent à des solutions de manières différentes selon les modèles de caméras et les techniques mathématiques utilisés. Carceroni et Brown (1997a) distinguent trois principales classes d'algorithmes : (1) analytique, (2) affine ou (3) numérique. Les solutions analytiques sont des algorithmes dans lesquelles on définit les propriétés de l'image en fonction d'une série prédéterminée de paramètres d'où l'on dérive des équations polynomiales nécessaires à une reconstruction 3D. Une des principales difficultés des solutions analytiques est qu'elles sont basées sur des équations géométriques non linéaires. Pour remédier à ce problème, des simplifications linéaires ont été élaborées, c'est-à-dire des modèles affines, dans lesquels on effectue une approximation des paramètres nécessaires à la reconstruction 3D. Ces approximations ne peuvent toutefois être appliquées que dans certaines conditions spécifiques. D'autres types d'approximation plus générale, les modèles numériques, ont été développés. L'approche de ces modèles exige de trouver un estimé à la solution puis, par une relation linéaire simple entre l'image de la caméra et l'objet, à effectuer des approximations (itérations) qui se succèdent jusqu'à ce que l'erreur entre les caractéristiques connues et celles calculées soit minimale.

2 LES OBJECTIFS

Ce projet visait à entreprendre des développements afin d'adapter une méthode d'analyse vidéo 3D pour estimer des chargements au dos en milieu de travail.

L'objectif principal du présent projet était donc d'explorer la faisabilité de n'utiliser qu'une seule caméra vidéo pour la reconstruction 3D de marqueurs.

Plus spécifiquement, il s'agissait tout d'abord d'établir le niveau d'erreur réalisé lors de la reconstruction 3D de marqueurs pour ensuite déterminer l'impact de cette erreur sur l'orientation relative de segments.

Deux objectifs secondaires étaient également poursuivis. D'abord, une interface permettant la visualisation des images, la numérisation et la correction des coordonnées de repères devait être développée. Ensuite, l'amélioration de la gestion des données manquantes découlant de repères cachés devait être poursuivie, puisque cette problématique est déterminante dans l'utilisation d'une seule caméra vidéo pour effectuer l'analyse du mouvement humain.

Ce projet comportait cinq grandes phases. La première phase provient du besoin de visualiser, corriger et numériser différents éléments sur une image vidéo. Elle consistait donc à développer une interface vidéo. Afin de pouvoir effectuer la reconstruction tridimensionnelle des coordonnées 3D de repères sur les images vidéo, le calibrage de la caméra était nécessaire et constituait la deuxième phase. La troisième phase consistait en la reconstruction 3D de la position et de l'orientation d'un corps rigide dans l'espace à partir d'une seule vue caméra. La quatrième phase visait l'intégration de différents algorithmes de gestion des données manquantes. Finalement, l'efficacité de cette méthode fut testée dans sa capacité à évaluer des rotations articulaires à l'aide d'un système articulé de petite dimension. Les objectifs, la méthodologie, les résultats et une discussion sont présentés pour chacune des phases.

3 DÉVELOPPEMENT DE L'INTERFACE VIDÉO

L'objectif de cette phase était de développer une interface permettant la visualisation, la numérisation des coordonnées de repères sur les objets étudiés, de même que la correction des coordonnées numérisées ou prédites à partir des algorithmes développés dans les phases ultérieures du projet. Cette interface devait permettre de superposer sur l'image vidéo les points et tous les éléments graphiques pouvant faciliter la numérisation, la visualisation ainsi que la correction des données numérisées. Notamment, il devait être possible de projeter les informations 3D des repères sur les images des caméras. L'interface devait également permettre la visualisation d'une vue virtuelle. Cette vue virtuelle devrait permettre d'observer la forme de l'ensemble des points et autres éléments graphiques dans une direction orthogonale à celle de la vue caméra.

Les éléments graphiques liés aux différents algorithmes de prédiction devaient pouvoir être affichés à l'usager de manière différentiable pour qu'il puisse choisir la meilleure prédiction. Ils devaient donc apparaître de couleur différente selon chaque algorithme de prédiction. Ces éléments pouvaient être une droite le long de laquelle la position d'un marqueur à numériser était prévue, une ellipse donnant les positions possibles du marqueur dans l'image, ou encore un point prédisant la position du marqueur dans l'image.

L'interface était l'outil de base à la réalisation de toutes les phases subséquentes du projet. Elle servait non seulement à la numérisation des coordonnées de repères utilisés, mais également à la correction et à la vérification de la justesse des différents algorithmes développés. L'interface a donc évolué tout au long du projet pour intégrer les différents algorithmes développés, et selon les différentes configurations d'utilisation. Ainsi, un nombre de caméras variables devait pouvoir être exploité selon les besoins (quatre, trois, deux, ou une seule caméra). Une configuration particulière au calibrage de la (ou des) caméra(s) vidéo a aussi été intégrée. Des nombres variables de repères à numériser (avec une liste défilante), et des nombres variables de corps rigides à traquer devaient pouvoir être utilisés.

L'interface vidéo ainsi développée a été utilisée dans deux configurations de caméra. D'abord, dans un contexte à trois caméras vidéo pour la numérisation de plus de 50 repères sur des sujets humains effectuant une tâche de manutention, puis dans un contexte avec une seule caméra vidéo avec un nombre de repères et de corps rigides restreint. L'utilité de l'interface et des algorithmes de prédiction a pu être appréciée de façon qualitative dans le contexte d'utilisation à trois caméras vidéo. Les phases subséquentes du projet ont permis d'adapter les algorithmes au contexte d'une seule caméra vidéo et de valider de manière quantitative les différents algorithmes. Le développement de l'interface a conduit à la production de trois guides selon le niveau d'utilisation. Un premier guide décrit de façon générale les principales fonctions et possibilités de l'interface. Un deuxième guide s'adresse aux utilisateurs de l'interface et décrit en détail la façon d'utiliser l'interface, les menus et les différentes options. Le troisième guide s'adresse aux éventuels programmeurs qui voudraient apporter des modifications à l'interface et décrit notamment les différentes librairies associées aux multiples fonctions de l'interface.

4 LE CALIBRAGE DE LA CAMÉRA

Le premier objectif poursuivi dans cette phase consistait à calibrer la caméra selon la technique du DLT standard (Kwon, 1998; Marzan, 1976). Le second objectif consistait à vérifier s'il était possible de déterminer les degrés de liberté de la caméra uniquement à partir d'un petit espace du champ de vision de la caméra, pouvant conduire au calibrage à partir de l'objet traqué.

Pour réaliser ces deux objectifs, un cadre d'aluminium muni d'un panneau mobile sur lequel un carrelage de 0,80 x 0,80 m était fixé a été utilisé (Figure 1). Le panneau pouvait se déplacer approximativement dans la direction de l'axe optique de la caméra. Un total de six positions équidistantes de 0,10 m furent utilisées. Le volume calibré était donc de 0,80 x 0,80 x 0,60 m. Un système optoélectronique (Optotrak, Nothern Digital Inc., Waterloo, Ontario) a été utilisé comme système de référence. Quatre diodes émettrices de lumières (DELs) étaient fixées sur le cadre d'aluminium et quatre autres sur le panneau mobile (Figure 1). L'espace expérimental entier était délimité par les quatre DELs sur le cadre d'aluminium et les quatre DELs sur le panneau à sa position la plus éloignée de la caméra. Ces huit DELs ont été numérisées sur l'image vidéo et ont servi à calibrer la caméra par la technique du DLT. Les intersections de carreaux ont été également numérisées à toutes les positions. Pour vérifier s'il était possible de déterminer les degrés de liberté de la caméra à partir d'un espace plus petit, nous avons choisi d'appliquer le calibrage de la caméra à différents sous-espaces de l'espace entier. Ce système donnait sept lignes, sept colonnes et six positions, soit 7 X 7 X 6 = 294 coordonnées distinctes. La dernière position a été numérisée à deux reprises afin de nous permettre d'évaluer la fidélité de nos estimations. Nous avions donc 7 X 7 X 7 = 343 coordonnées pour effectuer nos analyses. Cet arrangement offrait la possibilité de fractionner l'espace expérimental en 180 sous-espaces ayant chacun huit points pour effectuer le calibrage de la caméra.

Le calibrage sert à déterminer les caractéristiques de la caméra telle que modélisée. Le modèle retenu se nomme le « pinhole » et est le plus utilisé dans la littérature (Trucco et Verri, 1998, p. 26). Ce modèle met en évidence dix degrés de liberté (tableau 1). Afin de faciliter la compréhension du modèle de la caméra, il est utile de définir les différents référentiels utilisés (Figure 2). Un premier référentiel utilisé est celui du système optoélectronique de référence (Xopto, Yopto, Zopto). Un second référentiel, celui du laboratoire, (X_L, Y_L, Z_L) est déterminé lors du calibrage. Il a été orienté à l'aide des DELs alignées le mieux possible avec l'axe optique et le référentiel image (Figure 2). Son origine à été placée au centre du carrelage à 20 cm (vers la caméra) de la position du panneau la plus rapprochée de la caméra, de façon à ce que les coordonnées (exprimées en mètre) le long de Z_L soient toujours positives. Le référentiel image est bidimensionnel (u,v) et perpendiculaire à l'axe optique. Son origine a été placée à l'image de la ligne ayant la direction de Z_L et passant par le point nodal. Les coordonnées exprimées dans ce référentiel sont en pixels. Finalement, le référentiel de la caméra (Xc, Yc, Zc) est parallèle au référentiel image et son origine est au point nodal. Les coordonnées exprimées dans ce référentiel sont en mètres.

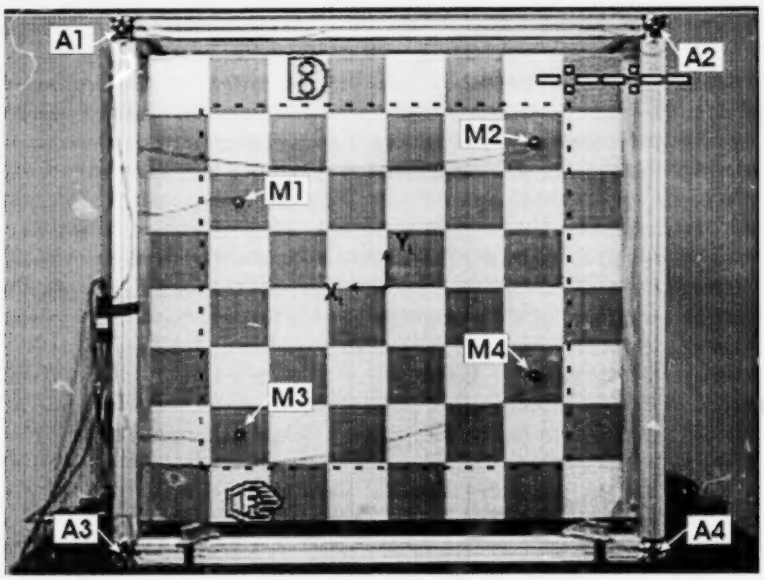


Figure 1 **Le système utilisé pour le calibrage de la caméra avec le panneau muni du carrelage dans sa position la plus rapprochée de la caméra. L'espace entier calibré est délimité par les quatre DELs sur la structure d'aluminium (A1, ..., A4) et par les quatre DELs sur le panneau mobile (M1, ..., M4) alors qu'il est à la position la plus éloignée de la caméra. La zone où toutes les intersections des carreaux ont été numérisées est délimitée par le pointillé.**

Tableau 1 Les degrés de liberté du modèle de la caméra

Description	
Position du point nodal de la caméra (centre de la lentille équivalente) dans le référentiel de la caméra	(Xc_o, Yc_o, Zc_o)
Position de l'axe optique dans le référentiel image de la caméra	(u_o, v_o)
Facteurs tenant compte de la distance focale de la caméra et des facteurs d'échelle entre le référentiel image de la caméra et le référentiel de la caméra	(S_u, S_v)
Orientation de la caméra par rapport au référentiel du laboratoire	(α, β, γ)

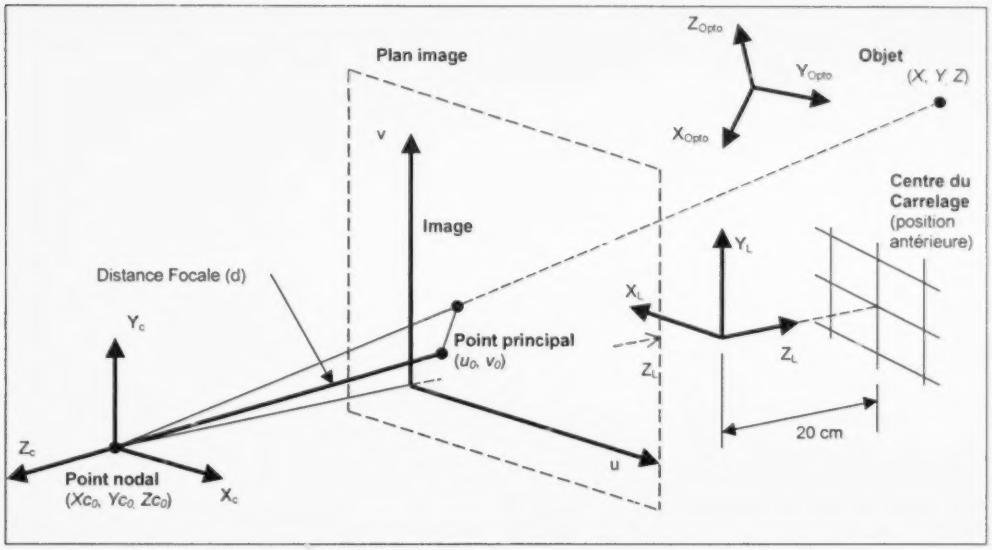


Figure 2 Représentation des différents référentiels. Le référentiel du laboratoire (X_L, Y_L, Z_L), le référentiel image de la caméra (u,v), et le référentiel de la caméra (Xc,Yc,Zc). Le point nodal (Xc_0,Yc_0,Zc_0) et le point principal (u_0,v_0) sont aussi représentés.

Trois formulations mathématiques ont été utilisées pour calculer les paramètres de la caméra pour les 180 sous-espaces. La première formulation détermine 12 coefficients et les valeurs des dix degrés de liberté sont déduites à partir de transformations mathématiques (Fu *et al.*, 1987). La seconde formulation calcule 11 coefficients et les valeurs des dix degrés de liberté sont également déduites à partir de transformations mathématiques (Kwon, 1998). La troisième formulation est celle de Eian et Poppele (2002) dans laquelle huit coefficients sont calculés et les valeurs de sept des dix degrés de liberté sont déduites à partir de formulations mathématiques.

Parmi les trois approches analysées pour effectuer le calibrage des sous-espaces, aucune n'a offert de solution satisfaisante, c'est-à-dire qu'aucune des approches considérées ne permettait d'obtenir des valeurs pour les degrés de liberté qui soient suffisamment stables à travers les différents sous-espaces. Les degrés de liberté pouvaient varier de plus de 100% d'un sous-espace à l'autre. Il semble donc préférable d'utiliser l'approche standard du DLT avec des points aux extrémités de l'espace expérimental entier.

L'erreur de projection du DLT, déterminée à partir de la numérisation des quatre DELs du panneau mobile à cinq positions différentes dans le volume calibré (5 positions x 4 DELs = 20 points numérisés), était de 0,55 pixel horizontalement (U), et de 0,36 pixel verticalement (V).

Ces valeurs correspondent à 1,13 mm et 0,75 mm respectivement, soit 0,2 % de la largeur du volume de calibrage en son centre. L'erreur de numérisation, établie en répétant la numérisation de quatre DELs dans la même position, était de 0,21 pixel horizontalement et verticalement.

Il aurait été préférable de réussir le calibrage à partir de sous-espaces puisque cela aurait facilité l'utilisation de l'approche pour des applications dans des contextes hors laboratoire. La résolution de l'image disponible pour la numérisation et la qualité des lentilles influencent la constance des paramètres de la caméra déterminés à partir des différents sous-espaces. Deux facteurs ont eu une influence sur les résultats de nos analyses : 1) le fait d'avoir 11 coefficients pour dix degrés de liberté ajoute une variabilité dans les valeurs numériques des dix degrés de liberté; 2) la faible résolution des images vidéo utilisées (640 x 480 pixels) ajoutait aussi une variabilité dans les résultats numériques de la numérisation et donc dans les valeurs des dix degrés de liberté. Dans ces conditions, les valeurs déterminées à partir des sous-espaces variaient d'une façon chaotique. Il est possible que sous d'autres conditions mathématiques (dix coefficients pour dix degrés de liberté) et expérimentales (meilleure résolution des images vidéo) une régularité des valeurs des dix degrés de liberté aurait été observée à travers les différents sous-espaces.

Comme déjà mentionné, il y a dix degrés de liberté à déterminer dans le modèle mathématique de la caméra. Toutefois, l'orientation (α, β, γ) de la caméra n'est utile que pour comparer les résultats avec Optotrak et cette information n'est pas requise pour la numérisation de repères dans la vue caméra. Il serait donc possible d'utiliser un modèle de caméra avec sept degrés de liberté. Ainsi, seulement quatre points seraient requis pour calibrer la caméra ce qui pourrait faciliter l'utilisation de l'approche dans des situations moins bien contrôlées qu'en laboratoire.

Lorsqu'une seule caméra est utilisée pour reconstruire la position spatiale d'un point, la solution des équations du DLT donne seulement une droite dans l'espace sur laquelle se trouve ce point. Il n'est donc pas possible de déterminer à quelle endroit sur cette droite se situe le point. Toutefois, lorsque trois points ou plus sont utilisés et que les relations entre ces points sont connues, il est possible de déterminer la position spatiale de ces points organisés à partir d'une seule caméra. La section suivante décrit l'approche retenue pour résoudre cette problématique.

5 LA RECONSTRUCTION 3D D'UN CORPS RIGIDE À PARTIR D'UNE SEULE VUE CAMÉRA

Il s'agissait essentiellement de tester la possibilité de récupérer les coordonnées 3D des repères à partir d'une seule vue caméra 2D. L'algorithme développé devait permettre de récupérer les coordonnées 3D de plusieurs repères placés sur un corps rigide à partir d'une seule vue caméra.

Plusieurs approches ont déjà été utilisées à cette fin (Ababsa *et al.*, 2002; Abidi et Chandra, 1995; Ambrosio *et al.*, 2001a; Eian et Poppele, 2002; Miller *et al.*, 1980; Pampagnin et Devy, 1991; Quan et Lan, 1999; Triboulet *et al.*, 2001; Wilczkowiak *et al.*, 2001). Toutefois, seules les techniques applicables à une configuration variable de points ont été considérées (Alter, 1992; Carceroni et Brown, 1997b; DeMenthon et Davis, 1992; Fichler et Bolles, 1981; Haralick *et al.*, 1991; Linnainmaa *et al.*, 1988; Lowe, 1987; Mallem *et al.*, 1999; N'Zi *et al.*, 1995). Ces méthodes sont groupées sous la nomination « *méthode perspective à N points (PNP)* ». La méthode perspective à trois points (P3P) est la plus répandue parmi les méthodes perspectives à N points. Cette méthode consiste à comparer les dimensions connues d'un triangle avec les coordonnées de la position des sommets du triangle dans une vue caméra. Lorsque les caractéristiques intrinsèques de la caméra sont connues, il est possible de résoudre analytiquement le problème. Selon Haralick (1991), il y a six approches analytiques publiées (Grunet 1841, Finsterwalder 1937, Merritt 1949, Fichler et Bolles, 1981, Linnainmaa et al. 1988, Grafarend 1989), et chacune de ces approches donne quatre solutions possibles pour la position tridimensionnelle des trois sommets du triangle dans l'espace. L'étude de la sensibilité numérique des différentes approches publiée par Haralick (1991) révèle que les solutions de Fichler et Bolles (1981) et de Linnainmaa et al. (1988) n'ont pas de singularité.

La technique la plus simple pour soulever l'ambiguïté des solutions, et déterminer laquelle est la bonne, consiste à reprojeter chaque candidat dans le plan image (Carceroni et Brown, 1997b, page 17). Toutefois, cette vérification n'est pas toujours suffisante pour s'assurer d'avoir une seule solution (Carceroni et Brown, 1997b, page 18). Puisque la méthode P3P possède des solutions multiples, il faut ajouter des informations si l'on veut tendre vers une solution unique. Par exemple, l'ajout d'un quatrième point suffit généralement à trouver la solution adéquate bien qu'il existe certaines conditions pour lesquelles il n'y a pas de solution unique. Théoriquement, jusqu'à cinq solutions peuvent exister pour la méthode P4P (Hu et Wu, 2002). En général, dans le cas d'un corps avec 6 points et plus, il y a toujours une garantie de trouver une solution unique (Carceroni et Brown, 1997b, page 9). Puisque nous voulons utiliser l'approche pour l'étude des mouvements humains, il est raisonnable de penser que les repères sur le corps rigide ne seront pas toujours tous visibles, et donc qu'un nombre variable de points devra être utilisé. L'approche devra donc permettre de varier aisément le nombre de points.

5.1 Description de la méthode utilisée

Puisque la méthode perspective à trois points comporte plusieurs solutions et que l'ajout d'un quatrième point diminue considérablement les probabilités de trouver plusieurs solutions, il était préférable d'établir l'approche pour un nombre variable de 4 à 6 points. L'approche retenue s'apparente beaucoup à celle de Lowe (1987). L'algorithme de Lowe est basé sur une

linéarisation des équations de projection perspective des coordonnées spatiales vers les coordonnées images de la caméra. Comme il s'agit d'une linéarisation, la méthode est itérative et nécessite une estimation initiale. Le système d'équations sera d'abord présenté, suivi de la méthode pour obtenir l'estimation initiale. La problématique de la méthode à quatre points sera ensuite introduite pour terminer avec une description de l'implantation de la démarche retenue.

5.1.1 Le système d'équations

Former l'image d'un objet dans une caméra consiste à projeter chaque point $\vec{P}_i$ de l'objet en un point $\vec{I}_i$ sur le plan image de la caméra (Figure 3). Lorsqu'une seule caméra est utilisée pour reconstruire la position spatiale d'un point, la solution des équations du DLT donne l'équation d'une droite dans l'espace sur laquelle se trouve ce point. Cette droite donne la trajectoire d'un rayon de lumière entre le point sur l'objet et son image.

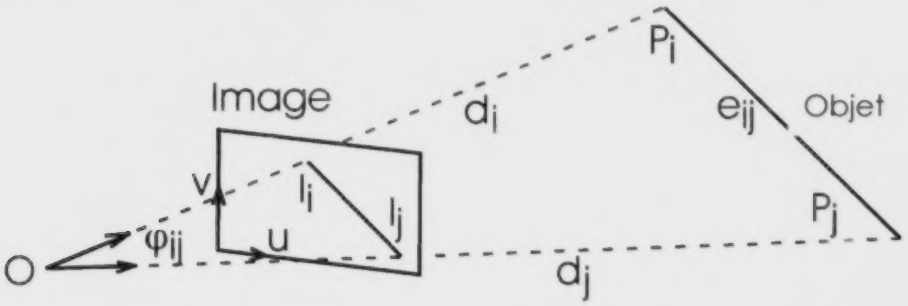


Figure 3 Deux rayons (d_i, d_j) formant l'image (I_i, I_j) de deux points (P_i, P_j) d'un objet.

Les équations des rayons formant l'image de deux points permettent de formuler une relation avec la distance entre les points :

$$d_i^2 + d_j^2 - 2d_i d_j \cos\left(\varphi_{ij}\right) = e_{ij}^2 \qquad (1)$$

On reconnaît ici la loi des cosinus où e_{ij} est la distance entre les deux points sur l'objet. L'angle φ_{ij} est l'angle entre les deux rayons. Les inconnues (dans l'équation 1) sont alors d_i et d_j, qui sont les distances entre le point nodal de la caméra et chaque point sur l'objet. En accord avec l'approche dite « Algorithme de Lowe » (Lowe, 1987) une technique numérique différentielle fut utilisée. L'idée directrice pour contrer la non linéarité de l'équation 1 consiste à obtenir une correction à partir d'approximations successives de la solution. De l'équation de la distance, l'équation différentielle par rapport aux inconnues d_i et d_j est formulée :

$$\left(d_i - 2d_j \cos\left(\varphi_{ij}\right)\right)\Delta d_i + \left(d_j - 2d_i \cos\left(\varphi_{ij}\right)\right)\Delta d_j = \Delta\left(e_{ij}^2\right) \qquad (2)$$

Pour « N » points sur l'objet, $\frac{N(N-1)}{2}$ équations distinctes peuvent être formulées. Ces équations sont utilisées pour former un système d'équations linéaires dont la solution est trouvée par la technique de décomposition singulière (« Singular Value Decomposition technique »). Le terme de droite du système d'équations linéaires représente la différence entre les distances réelles sur l'objet et les longueurs calculées avec l'équation 1 en utilisant l'approximation précédente, d'où la nécessité d'une estimation initiale. Dès qu'il y a trois points, le système d'équations formé permet d'obtenir des termes correctifs pour les distances $(\Delta d_1, \Delta d_2, ..., \Delta d_N)$. Ces valeurs de correction sont appliquées à l'approximation courante afin de réduire la différence de distances ($\Delta(e_{ij}^2)$). Des observations préliminaires ont démontré que la différence de distances ne varie presque plus après 8 itérations. Ainsi, le nombre d'itérations a été fixé à 20 pour le moment. Cet ajustement nous a donné une erreur moyenne sur chaque distance e_{ij} de 0,0022 m.

Lorsqu'une solution est trouvée, la coordonnée du point dans l'espace est alors calculée à partir des équations des droites que le DLT nous a fournies :

$$\vec{p}_i = \vec{o} + d_i \vec{l}_i$$

où $\vec{p}_i$ est la position cherchée du point dans l'espace, $\vec{o}$ est la position du point nodal de la caméra, $\vec{l}_i$ est le vecteur directeur de la droite décrivant le rayon de lumière formant l'image du point i dans la caméra, et d_i est la solution obtenue par l'équation 2 pour le point i.

Une matrice homogène (M) de transformation entre les coordonnées locales du corps rigide et les positions $(\vec{p}_1, \vec{p}_2, ..., \vec{p}_N)$ est alors calculée.

5.1.2 La méthode utilisée pour déterminer l'estimation initiale

Puisque les dimensions du corps rigide sont connues, les distances minimale (e_{min}) et maximale (e_{max}) entre les points sont connues. À partir de l'ensemble des équations de droites dans l'espace décrivant la trajectoire de chaque point de l'objet, l'angle maximal (φ_{max}) entre les droites est déterminé. En posant les distances d_i et d_j approximativement égales $(d_i \approx d_j)$, l'équation 1 de la section précédente permet alors de trouver une estimation pour les d_i :

$$d_{min}^2 = \frac{e_{min}^2}{2(1-\cos(\varphi_{max}))} \text{ et } d_{max}^2 = \frac{e_{max}^2}{2(1-\cos(\varphi_{max}))}$$

$$d_i = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}$$

5.1.3 Le problème de quatre points (P4P)

La solution du système d'équations linéaires ne garantit toutefois pas une solution unique. Dans le cas de quatre points, il y a plus d'une solution dans des configurations particulières. Les figures 4 et 5 illustrent des exemples de positions dans l'espace qui ne peuvent être discriminées.

Dans l'exemple de la figure 4, une des deux situations peut aisément être éliminée. En effet, lors de la numérisation l'opérateur introduit des informations supplémentaires précisant la configuration des points, c'est-à-dire que chaque point est identifié. Ainsi, même si les deux solutions présentées à la figure 4 offrent la même image, elles ne représentent pas le même corps rigide puisque l'une est l'image miroir de l'autre. Si une matrice de transformation entre l'objet et chaque solution est calculée, une seule solution mathématiquement adéquate est possible, car mathématiquement la solution miroir donne une matrice dont le déterminant est négatif. Il suffit donc de calculer cette matrice de transformation entre l'objet et la prédiction pour trouver la solution de ce cas, la solution adéquate étant celle donnant une matrice dont le déterminant est positif et voisin de l'unité. Cependant, l'exemple de la figure 5 illustre une situation particulière où il n'est pas possible de discriminer les deux solutions illustrées. L'algorithme dans sa forme actuelle ne peut donc permettre d'établir de solution unique dans ce cas particulier.

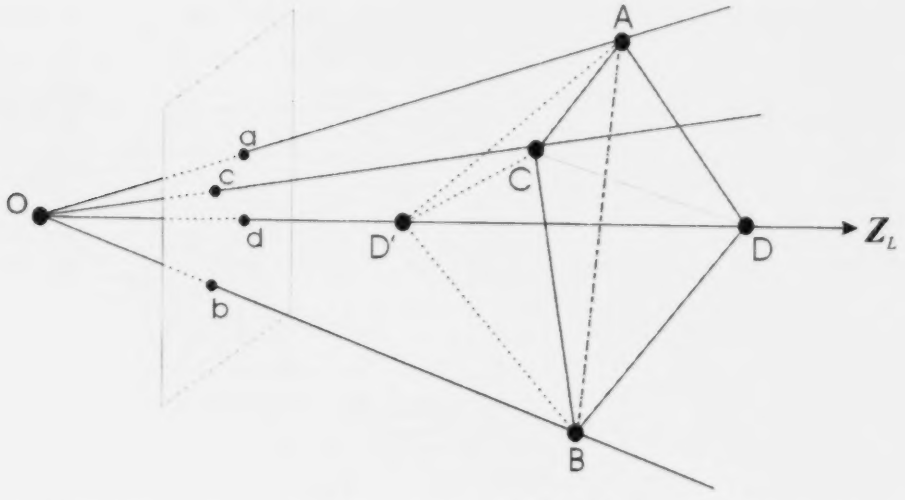


Figure 4 Exemple d'une configuration où plus d'une solution est possible dans le cas de quatre points : les images du tétraèdre formées par les points A,B,C,D et par les points A,B,C,D' sont identiques dans les deux cas (a,b,c,d), les distances entre les 4 points sont identiques dans les deux cas, mais pourtant les coordonnées 3D des points D et D' sont différentes.

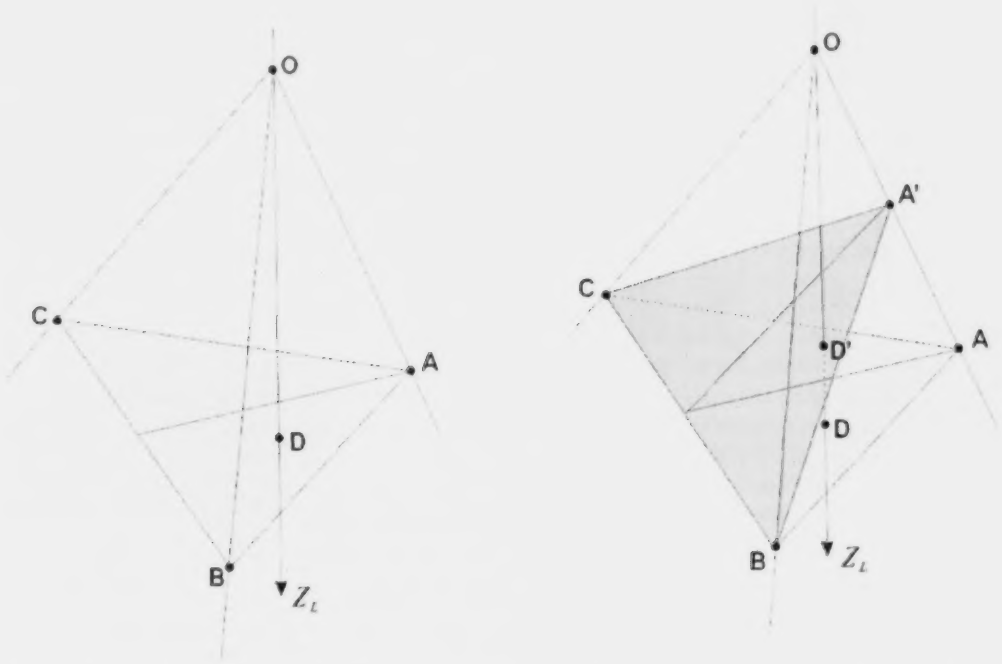


Figure 5 La figure de gauche illustre une configuration de quatre points (A,B,C,D). Suite à une rotation de l'objet autour de BC, la figure de droite illustre une autre configuration (A',B,C,D') qui ne pourrait être discriminée de la première sur l'image. Encore une fois, l'image des deux configurations de quatre points est la même et les distances entre les points sont les mêmes, bien que les positions spatiales des points A' et D' soient différentes des points A et D.

5.1.4 Implantation de la démarche

L'implantation de la démarche s'effectue en trois étapes :

Première étape. Après avoir obtenu une première solution à l'aide de l'estimé initial déterminé par la méthode décrite à la section 5.1.2, la première étape de la démarche consiste à générer d'autres estimés initiaux qui vont converger vers une solution différente. À cette fin, deux approches sont exploitées.

- Le déplacement des sommets (figure 6a). Parmi les trois points, on détermine d'abord celui qui est le plus près du point nodal (L_{min}), puis celui qui est le plus loin (L_{max}). Un premier estimé initial est obtenu en déplaçant le point intermédiaire à la distance minimale et un deuxième estimé initial en le déplaçant à la distance maximale. Un troisième estimé est obtenu en déplaçant le point le plus près du point nodal à la distance maximale. Un

quatrième estimé est obtenu en déplaçant le point le plus loin du point nodal à la distance minimale. Enfin, pour chaque estimé on tente de déterminer une solution supplémentaire.

- La permutation des d_i (Figure 6b). Pour chaque solution supplémentaire trouvée par le déplacement des sommets, cinq nouveaux estimés sont générés. Il s'agit de générer toutes les possibilités obtenues en permutant les d_i des solutions supplémentaires.

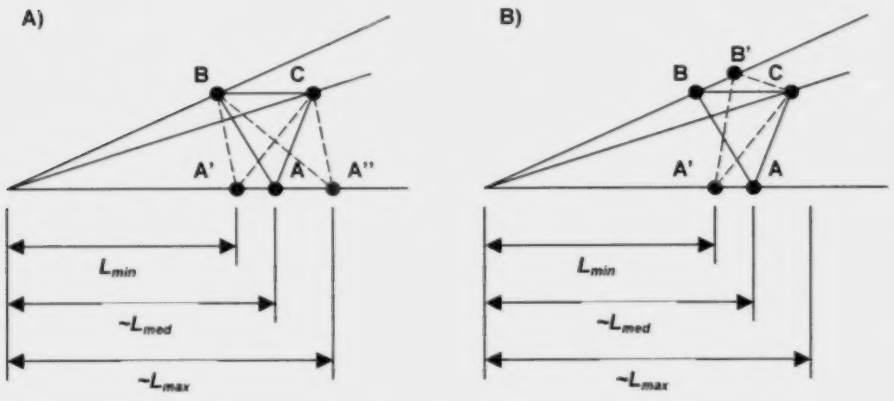


Figure 6 A) Le déplacement des sommets. ABC est la première solution obtenue, $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$. En déplaçant A, nous obtenons deux autres estimations initiales : (1) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$ (A'BC) et (2) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$ (A''BC). De façon similaire, deux autres estimations initiales sont obtenues pour un total de quatre : (3) $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{max}$ et (4) $d_A=L_{med}$, $d_B=_{min}$, $d_C=_{min}$. B) La permutation des d_i. ABC est une solution provenant du déplacement des sommets, $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{max}$. En permutant les valeurs de d_A et de d_B, nous obtenons une autre estimation initiale : (1) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{med}$, $d_C=L_{max}$ (A'B'C). Quatre autres estimations initiales sont obtenues de façon similaire pour un total de cinq : (2) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{min}$, $d_C=L_{med}$; (3) $d_A=L_{min}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{med}$; (4) $d_A=L_{med}$, $d_B=L_{max}$, $d_C=L_{min}$ et (5) $d_A=L_{max}$, $d_B=L_{med}$, $d_C=L_{min}$.

Deuxième étape (Figure 7). La seconde étape consiste à l'ajout de points. Pour toutes les solutions obtenues à l'étape un, il s'agit d'ajouter un à un, les n points restants selon deux estimations initiales : le premier considérant que le point se trouve du côté le plus près du point nodal et l'autre considérant que le point se trouve du côté le plus loin du point nodal.

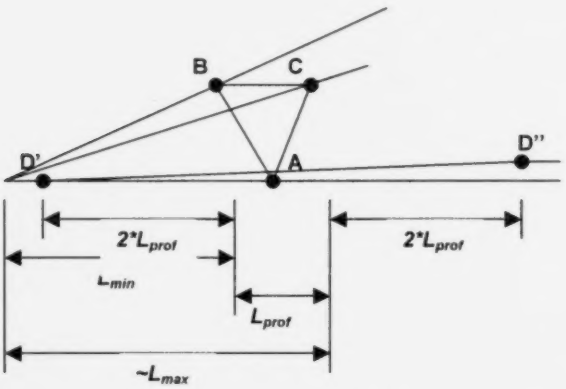


Figure 7 Représentation de l'ajout d'un quatrième point. ABC est une solution, d_A=L_{med}, d_B=L_{min}, d_C=L_{max}. L_{prof} = L_{max} –L_{min}. Chaque point supplémentaire est ajouté à l'aide de deux estimés initiaux. Ainsi, d_D est estimé comme étant égal à L_{min} – 2*L_{prof}(ABCD') puis comme étant égal à L_{max} + 2*L_{prof}(ABCD'').

Troisième étape. La dernière étape consiste à conserver les solutions donnant une matrice dont le déterminant est positif et voisin de l'unité, telle que décrit à la section 5.1.3.

Enfin, la démarche peut également s'appliquer à l'étude de plusieurs corps rigides articulés. Dans ce cas, des points communs à deux corps rigide sont disponibles (e.g. le centre articulaire). La reconstruction d'un corps rigide à partir de seulement trois points peut donc être possible, puisqu'un point est connu *a priori* (le point commun).

5.2 Procédure de vérification de la méthode proposée

Afin de tester la méthode proposée (approche vidéo), une collecte de données en laboratoire a été réalisée. Cette collecte avait pour but d'évaluer l'efficacité de l'approche vidéo en comparant l'orientation dans l'espace du corps rigide obtenue à celle obtenue directement par un système optoélectronique possédant un haut niveau d'exactitude (Optotrak, Northern Digital inc., Waterloo, Ont.). Un corps rigide composé de six repères a été utilisé. Ces repères étaient composés d'une DEL du système Optotrak autour de laquelle un matériau rétroréfléchissant a été collé afin qu'il soit aisément visible sur l'image vidéo (Figure 8). Connaissant les coordonnées de chaque repère dans le référentiel du corps rigide, il devient possible de déterminer la coordonnée de l'origine du corps rigide lorsque les coordonnées 3D des repères décrivent un contour dont la surface n'est pas nulle.

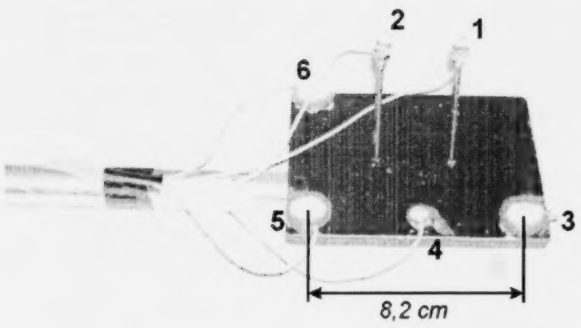


Figure 8 Le corps rigide utilisé et les six repères à partir desquels sa position et son orientation ont été déterminées.

Le corps rigide était déplacé de façon libre par l'expérimentateur avec un mouvement lent et continu, à l'intérieur de l'espace entier calibré lors de la phase précédente (0,80 x 0,80 x 0,60 m). D'après le système Optotrak, le mouvement effectué a engendré des rotations du corps rigide d'une amplitude de près de 60° autour de l'axe optique de la caméra vidéo (Zc), et d'une amplitude de près de 80° autour des deux autres axes (Xc, Yc). Bien que les images vidéo étaient acquises à 60 Hz, seulement les images où tous les repères du corps rigide étaient visibles furent numérisées manuellement (1725 images numérisées manuellement). Dans cette étude le

numériseur avait l'instruction de viser le centre des repères visibles. Une étude de la reconstruction 3D avec différentes combinaisons de repères parmi les six disponibles a été effectuée et seules les combinaisons de quatre repères et plus ont été étudiées. L'erreur sur la position de l'origine du référentiel a été obtenue en comparant les valeurs 3D de l'approche vidéo avec les données 3D d'Optotrak projetées dans le référentiel de la caméra.

5.3 Résultats et discussion

Lorsque les six repères sont considérés pour déterminer la position du corps rigide, l'erreur quadratique (RMS) sur la position de son origine était de 0,002, 0,003 et 0,025 m en X, Y et Z respectivement (Tableau 2). Évidemment, c'est l'erreur en Z (le long de l'axe optique de la caméra) qui est la plus grande. Bien que l'écart maximal atteint 0,096 m en Z, il est important de remarquer que dans 95% des cas, l'erreur est plus petite que 0,051 m.

Tableau 2 Erreur (m) quadratique (RMS) et écart maximal sur la position de l'origine du corps rigide selon les axes, ainsi que la valeur du 95^{e} centile de la distribution des écarts

	Erreur RMS	Écart maximal	95e centile
X_L	0.002	0.009	0.004
Y_L	0.003	0.013	0.006
Z_L	0.025	0.096	0.051

L'analyse des différentes combinaisons de repères révèle que pour toutes les combinaisons excluant le repère 6 (voir figure 8) l'erreur est accentuée. Ainsi, comme l'illustre la figure 9A, toutes les combinaisons de quatre repères incluant le repère 6 produisent des résultats avec une erreur moyenne de moins de 0,050 m pour une distance de caméra de 2 mètres. À l'inverse, les combinaisons de quatre repères excluant le repère 6 donnent des résultats moins intéressants (Figure 9B). Ceci s'explique probablement par le fait que les repères de ces combinaisons sont quasi coplanaires et que la présence du repère 6 élargissant le corps rigide augmente l'effet de perspective. L'exploitation de cinq repères plutôt que quatre donne également des résultats satisfaisants, à l'exception encore une fois de la combinaison de cinq repères excluant le repère 6 (Figure 9C), puisque ceux-ci sont encore une fois coplanaires.

Les résultats démontrent qu'il est possible d'obtenir la position spatiale d'un corps rigide muni de six repères à partir d'une seule vue caméra avec une exactitude satisfaisante. Dans l'éventualité de l'exploitation de cette approche pour l'analyse de mouvements complexes dans l'espace, il est probable que les six repères du corps rigide ne soient pas toujours visibles. Les résultats sur l'analyse des différentes combinaisons de repères révèlent qu'il est possible de déterminer la position spatiale d'un corps rigide à l'aide de quatre repères, si leur configuration est adéquate. D'après les résultats, les repères doivent toujours former une image ayant une surface la plus grande possible ce qui implique qu'ils ne doivent pas être coplanaires. L'exploitation de cinq repères non coplanaires semble assurer des résultats semblables à

l'utilisation de six repères et légèrement supérieurs à l'utilisation de quatre repères. Il est important de souligner que l'approche utilisée ici ne garantit pas une solution unique dans le cas de quatre points non coplanaires pour des cas particuliers (c.f. figure 5). Il se peut donc que, dans les cas où seulement quatre points non coplanaires sont disponibles, la solution retenue ne soit pas la solution idéale. En comparaison avec la littérature, Miller et al. (1980) rapportait un niveau d'erreur sur la position de 0,005 m, N'Zi et al. (1995) rapportaient une erreur de 0,013 m, et Eian et Poppele (2002) ont observé une erreur de 0,002 m. Aucune de ces études ne rapporte l'erreur selon les différents axes, et la grandeur des volumes calibrés varie considérablement d'une étude à l'autre. L'erreur de reconstruction obtenue dans la présente étude est du même ordre de grandeur que ces études et satisfaisante.

L'idée de reconstruire un corps rigide dans l'espace à partir d'une seule vue caméra n'est pas nouvelle en soi. Cependant, l'étude de l'erreur de reconstruction selon différents nombres de repères n'avait pas à notre connaissance été réalisée auparavant. C'est une étape importante avant d'envisager l'utilisation de cette approche pour évaluer la cinématique du corps humain.

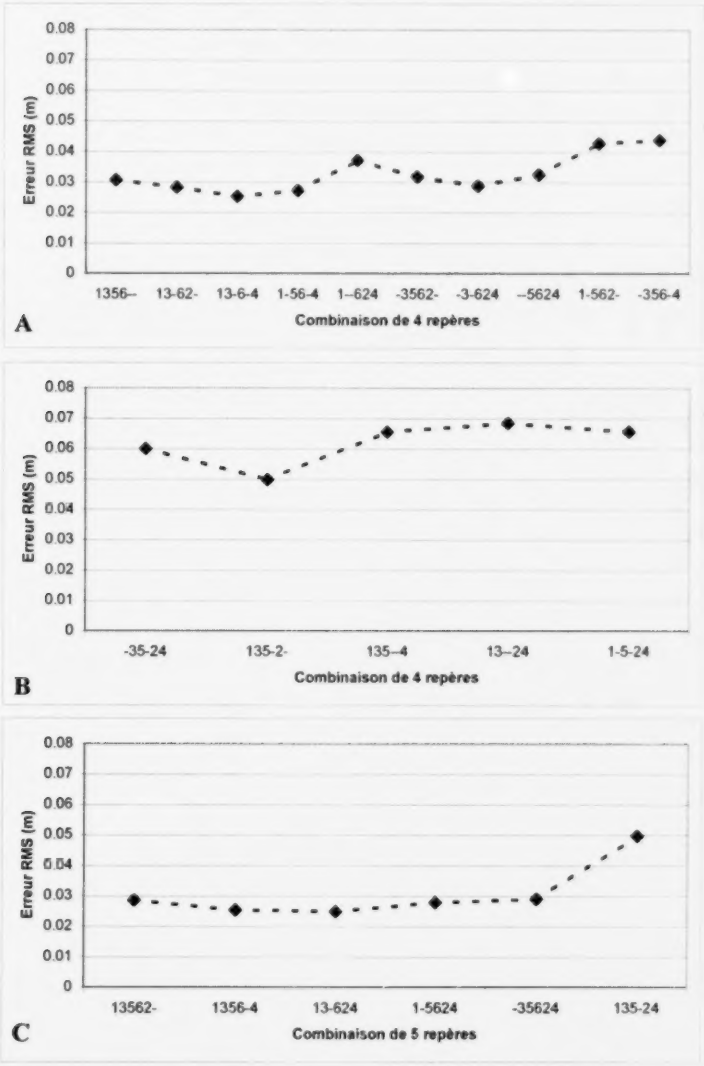


Figure 9 Représentation des erreurs quadratiques (RMS) sur l'axe Z_L (approximativement l'axe optique) en fonction des combinaisons de quatre repères incluant le repère 6 (A), excluant le repère 6 (B) et des combinaisons de cinq repères (C).

6 INTÉGRATION DES ALGORITHMES DE GESTION DES DONNÉES MANQUANTES

Malgré la possibilité d'utiliser seulement quatre repères pour reconstruire la position spatiale d'un corps rigide, il est fort probable que les coordonnées 3D de tous les repères ne soient pas visibles en tout temps pour en déduire la cinématique. Il est donc nécessaire d'exploiter des algorithmes permettant d'estimer les coordonnées de repères cachés à partir des repères voisins disponibles. Ces algorithmes peuvent, au moyen de relations géométriques simples comme la longueur de segments rigides, l'intersection de deux ou plusieurs droites ou encore l'intersection de cercles, permettre de retrouver les coordonnées 3D de repères qui n'ont pu être numérisés car ils n'étaient pas visibles (Desjardins *et al.*, 2002). Des algorithmes de gestion des données manquantes de façon ponctuelle ont été intégrés à l'interface vidéo et vérifiés grâce à celle-ci qualitativement pour la numérisation de tâches de manutention.

Le temps nécessaire pour réaliser la numérisation des repères sur les images vidéo constitue une difficulté importante dans la réalisation d'études du mouvement, en plus des difficultés de numérisation associées à l'occlusion et au croisement de marqueurs qui peuvent engendrer des erreurs. Afin de réduire le nombre d'images à numériser manuellement, deux techniques de remplissage temporel ont été implantées. Pour ce faire, une organisation particulière a été établie. Chaque repère est considéré à l'extrémité distale d'une tige, et chaque tige est attachée à une autre tige, et ce jusqu'à l'origine du référentiel du laboratoire. Comme chaque tige possède une longueur et une orientation (représenté par un quaternion; Kuipers, 2002), il est possible d'effectuer une interpolation sur sa longueur ou sur son orientation.

Une première technique consiste à interpoler la longueur de la tige par spline quintique et le quaternion par interpolation sphérique linéaire (Slerp). La deuxième technique consiste à interpoler chaque composante de position des repères par spline quintique.

Pour tester ces algorithmes d'interpolation, nous avons choisi de renumériser le même mouvement du corps rigide utilisé dans la phase précédente, mais cette fois en exploitant les algorithmes d'interpolation. Pour ce faire, la numérisation ne pouvait pas s'effectuer séquentiellement image par image. Le processus de cette numérisation assistée est illustré à la figure 10. L'utilisateur devait d'abord numériser cinq images réparties également à travers l'ensemble des images et incluant la première et la dernière image de la séquence à numériser. Les algorithmes d'interpolation étaient ensuite appliqués une première fois sur ces cinq images. À partir de ce moment, l'utilisateur avait la possibilité d'accepter un repère interpolé par une des méthodes ou de le numériser manuellement. L'utilisateur était ensuite appelé à numériser quatre nouvelles images, réparties également entre les cinq premières images numérisées. Les algorithmes d'interpolation étaient appliqués une seconde fois sur les neuf images maintenant disponibles. À la troisième numérisation, ce sont 8 nouvelles images, réparties également à travers les neuf premières images numérisées, qui devaient être numérisées. Le processus se répétait jusqu'à ce que l'utilisateur juge les prédictions des algorithmes d'interpolation suffisamment justes pour ne plus avoir à numériser les repères de façon manuelle sur d'autres images. Cette approche devait non seulement permettre de générer des coordonnées pour des repères qui ne sont pas nécessairement visibles, mais aussi accélérer le processus de

numérisation sans pour autant affecter la précision des coordonnées obtenues. Une comparaison avec les résultats obtenus lors de la phase précédente a été réalisée, en plus d'une analyse de la fréquence d'utilisation des différents algorithmes d'interpolation.

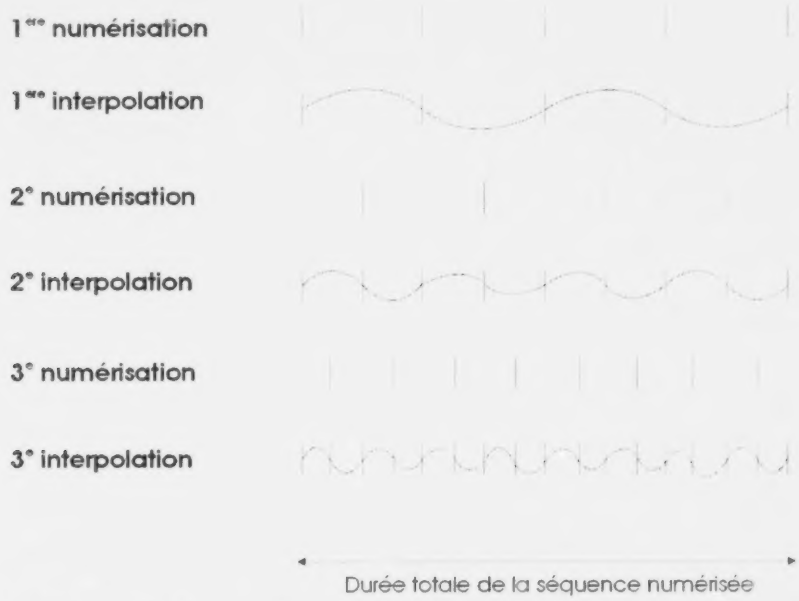


Figure 10 Illustration des premières étapes du processus de la numérisation assistée, où chaque trait vertical représente une image. Les étapes de numérisation indiquent les images numérisées à cette étape. Les étapes d'interpolation indiquent les images utilisées par les méthodes d'interpolation pour générer les prédictions.

L'analyse du processus de numérisation, résumée au tableau 3, révèle que l'utilisateur est intervenu sur 268 des 2379 images à numériser, soit environ une fois toutes les neuf images. Sur ces 268 images, l'utilisateur a numérisé les six DELs du corps rigide pour 127 images. Il a choisi de retenir l'interpolation par spline pour 123 images (générant des données pour 2000 images), et l'interpolation par slerp pour 18 images (générant des données pour 252 images). Les autres algorithmes d'interpolation n'ont pas été retenus dans cette situation simple n'impliquant qu'un seul corps rigide.

Tableau 3 Résultats du processus de numérisation exploitant les algorithmes d'interpolation

	Images avec intervention	Images avec information générée
Numérisée manuellement	127	127
Interpolation par spline	123	2000
Interpolation par slerp	18	252
Total	268	2379

La comparaison de l'approche standard de numérisation manuelle à la nouvelle approche de numérisation assistée révèle la supériorité de cette dernière (Tableau 4). Non seulement la durée pour effectuer la numérisation est cinq fois inférieure, mais la précision de la numérisation assistée semble également légèrement supérieure.

Tableau 4 Erreur quadratique moyenne (m) pour chaque axe, écart maximal sur l'axe Zc (m) et durée pour effectuer la numérisation manuelle en comparaison avec la numérisation assistée

	Numérisation manuelle	Numérisation assistée
Erreur X_c	0.002	0.002
Erreur Y_c	0.003	0.003
Erreur Z_c	0.030	0.015
Écart max.	0.178	0.105
Durée	13h05	2h30

Toutes les analyses effectuées ont été réalisées sur les données numérisées sans filtrer les coordonnées, comme il est normalement d'usage de le faire dans les analyses cinématiques du mouvement. Ainsi, il est possible que pour la numérisation manuelle, l'application d'un filtre sur les coordonnées numérisées atténue l'erreur à un niveau similaire à celui de la numérisation assistée. Avec cette dernière méthode, le fait que plusieurs points étaient interpolés par spline assure une certaine continuité dans les coordonnées. La représentation graphique de la coordonnée Z_L (i.e. le long de l'axe optique) de l'origine du référentiel du corps rigide telle qu'obtenue par les deux méthodes de numérisation (Figure 11) démontre bien ce fait. Un filtrage des données obtenues pourrait également être appliqué à la toute fin du processus de la numérisation assistée et pourrait contribuer à raffiner cette approche.

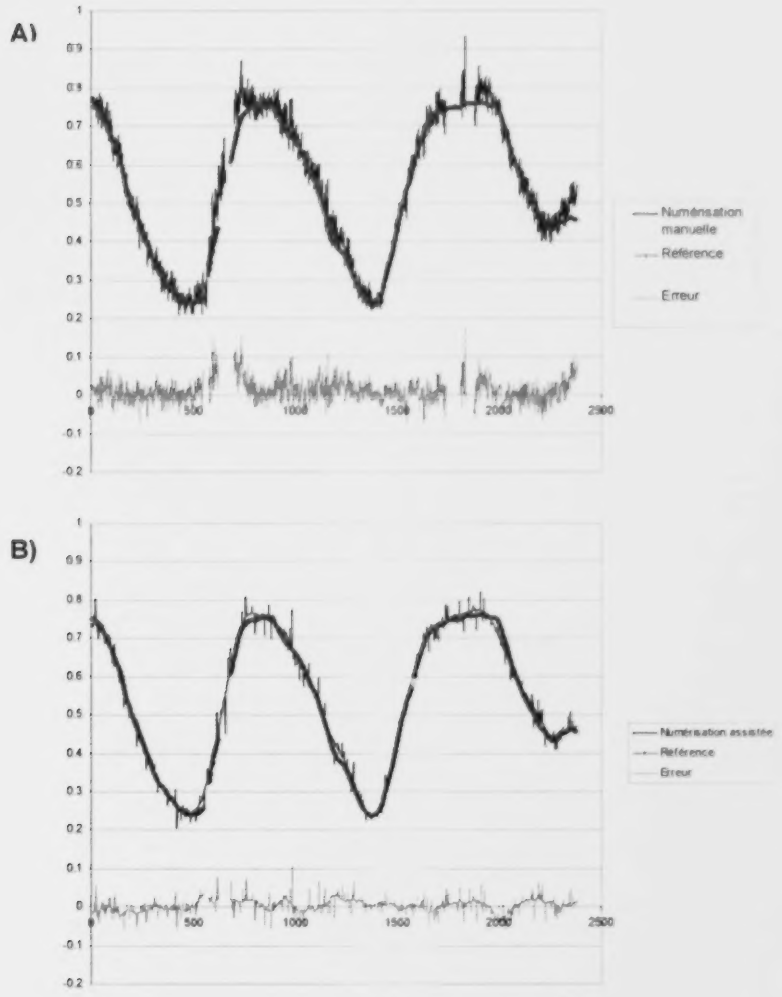


Figure 11 **Graphiques de la coordonnées Z_L (i.e. le long de l'axe optique) de l'origine du corps rigide telle qu'obtenue par la méthode de numérisation manuelle (A) et par la méthode de numérisation assistée (B) en comparaison à celle obtenue par la méthode de référence ainsi que l'erreur (différence entre les deux méthodes et la référence).**

7 APPLICATION À LA RECONSTRUCTION DE PLUSIEURS CORPS RIGIDES RELIÉS PAR DES ARTICULATIONS

Cette phase avait pour objectif d'évaluer l'impact des erreurs de reconstruction 3D obtenues à partir d'une seule caméra sur la mesure d'orientations relatives entre deux segments dans un mouvement complexe. Une autre collecte de données a été réalisée à cette fin.

Un système articulé (un mini-robot) avec des segments de longueur fixe connue a été utilisé pour générer des mouvements contrôlés (Figure 12). Des boules sphériques rétroréfléchissantes de même que des DELs ont été placées sur les différents segments du robot (voir la figure 12 et le tableau 5). Cette fois, les positions des DELs du système optoélectronique de référence ne correspondaient pas directement à celles des centres des sphères rétroréfléchissantes. Un référentiel temporaire a été calculé à partir des coordonnées des DELs de chaque segment. Les coordonnées des centres des sphères ont été obtenues en pointant trois points sur la surface de chaque sphère dans ce référentiel temporaire à l'aide d'une sonde munie de 25 DELs (Northern Digital Inc.). Les coordonnées du centre de ces sphères étaient donc calculées dans ce référentiel temporaire, ce qui permettait de suivre les coordonnées du centre des sphères en tout temps à partir du système optoélectronique de référence. Les mêmes sphères étaient numérisées par le système vidéo. Cela a permis de calculer les centres articulaires ainsi que les référentiels segmentaires à partir des mêmes sphères, selon les mêmes règles pour le système vidéo et le système de référence.

L'épaule est une articulation sphérique alors que le coude et le poignet sont des rotules planes. L'axe de flexion du coude était orthogonal à l'axe de flexion du poignet. Il était aisé de placer une sphère de part et d'autre de l'axe de rotation de chaque articulation. Le centre articulaire se situait à mi-distance d'une droite passant par le centre de ces deux sphères; l'axe transverse du segment proximal à l'articulation était identifié par cette même droite. L'axe longitudinal était choisi comme étant la droite passant par les centres articulaires de deux segments successifs. L'axe sagittal était alors obtenu par le produit vectoriel des deux autres. L'axe transverse était recalculé par le produit vectoriel des axes longitudinal et sagittal pour assurer l'orthogonalité du référentiel. Les angles articulaires, conformément à la convention de Grood et Suntay (1983), ont été calculés à partir des référentiels segmentaires. La définition des angles de flexion/extension, de rotation et d'abduction/adduction selon ce type de référentiel est donnée au tableau 6. De plus, un quaternion relatif entre deux segments adjacents était également calculé.

L'erreur a été évaluée de deux façons. Une comparaison des angles articulaires obtenus avec l'approche vidéo et ceux obtenus avec le système optoélectronique a d'abord été réalisée. De plus, pour chaque articulation du Robot, le quaternion relatif obtenu par le système optoélectronique de référence a été comparé au quaternion relatif obtenu par le système vidéo par la distance entre ces quaternions (Ude, 1999). La distance est le double de l'angle entre deux quaternions qui est obtenu par le produit scalaire des deux quaternions, de façon similaire au produit scalaire de deux vecteurs.

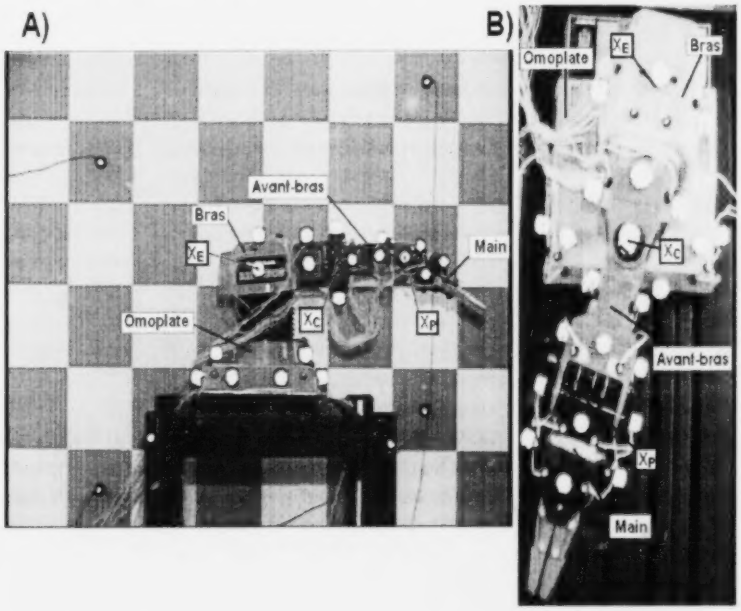


Figure 12 **Le système articulé avec les repères rétroréfléchissants et les DELs utilisés pour évaluer l'impact de l'erreur de reconstruction sur les angles relatifs vue de côté (A), et vue en plongée (B). Le système est composé de quatre segments distincts : 1) un segment nommé omoplate, 2) un segment nommé bras, 3) un segment nommé avant-bras et 4) un segment nommé main. Les points X_E, X_C et X_P indiquent la position approximative des centres articulaires de l'épaule, du coude et du poignet, respectivement.**

Tableau 5 **Nombre de repères pouvant être numérisés et nombre de repères d'Optotrak pour chaque segment du système articulé**

Nom du segment	Nombre de repères pouvant être numérisés	Nombre de repères d'Optotrak
Omoplate	6	6
Bras	8	6
Avant-bras	9	6
Main	6	6

Tableau 6 Définitions cliniques des angles selon le référentiel articulaire utilisé

Angle	Définition clinique
Flexion et extension :	Angle entre les vecteurs longitudinaux dans le plan normal à l'axe transverse du segment proximal
Rotation :	Angle entre les vecteurs transverses dans le plan normal à l'axe longitudinal du segment distal
Abduction et adduction :	Le complément de l'angle entre le vecteur transverse du segment proximal et le vecteur longitudinal du segment distal, dans le plan normal à l'axe dit flottant. L'axe flottant est justement dans la direction du produit vectoriel entre l'axe transverse du segment distal et le vecteur longitudinal du segment proximal.

Les résultats révèlent que l'erreur moyenne de l'approche vidéo sur les angles articulaires est généralement inférieure à 5° (Tableau 7), ce qui est satisfaisant dans le cadre d'études de la posture en milieu de travail. L'erreur sur l'angle de flexion est plus grande au niveau du poignet (5.0°), suivi du coude (2.1°) puis de l'épaule (1.8°). La distance moyenne entre les quaternions déterminés par l'approche vidéo et par le système optoélectronique de référence était de 5.0° pour le poignet, de 3.6° pour le coude et de 4.6° pour l'épaule (Tableau 8). De plus, il peut être constaté que 95% des valeurs de distance sont inférieures à 7.0° pour l'épaule, à 6.7° pour le coude, et à 11.5° pour le poignet (Tableau 8). La plus grande erreur sur le poignet s'explique essentiellement par le positionnement des repères sur la main et leur visibilité dans la vue utilisée. Les repères constituant la main étaient très proches les uns des autres. Ainsi la moindre erreur de reconstruction sur un repère pouvait grandement affecter l'orientation des axes du référentiel de la main, ce qui pouvait contribuer à augmenter l'erreur sur les angles. L'examen de la figure 13 révèle que l'erreur sur l'angle du poignet était plus grande dans les zones où le poignet était en extension. À ce moment, il était très fréquent que seulement trois repères sur la main soient visibles. Comme l'illustre la figure 12, le positionnement des six repères de la main (visibles du dessus de la main) ne garantissait pas qu'un maximum de repères soient visibles lorsque la main était visible du dessous, comme c'était le cas lorsque le poignet se déplaçait en extension.

Tableau 7 L'erreur quadratique moyenne (RMS) et l'écart maximal (°) entre l'approche vidéo à une caméra et la méthode optoélectronique de référence sur les différents angles articulaires des trois articulations du système étudié de même que l'étendue du mouvement articulaire déterminée selon chaque approche

	Flexion/extension	Abd/adduction	Rotation
Épaule			
Erreur RMS	1.8	3.7	3.1
Écart maximal	4	9	11
Étendue[1]	123	30	16
Étendue référence [2]	125	29	4
Coude			
Erreur RMS	2.1	1.9	3.1
Écart maximal	8	9	7
Étendue[1]	120	12	15
Étendue référence [2]	118	3	9
Poignet			
Erreur RMS	5.0	2.3	2.8
Écart maximal	16	8	13
Étendue[1]	135	12	8
Étendue référence [2]	131	10	12

[1] Selon la nouvelle approche de numérisation assistée

[2] Selon la méthode de référence avec le système optoélectronique

Tableau 8 Valeurs moyennes, médiane, du 95^{e} centile et maximale de la distance (°) entre les quaternions déterminés par l'approche vidéo et la méthode optoélectronique de référence pour chaque articulation

	Épaule	Coude	Poignet
Moyenne	4.6	3.6	5.0
Médiane	4.3	3.1	4.4
95^{e} centile	7.0	6.7	11.5
Maximum	13.0	9.8	15.8

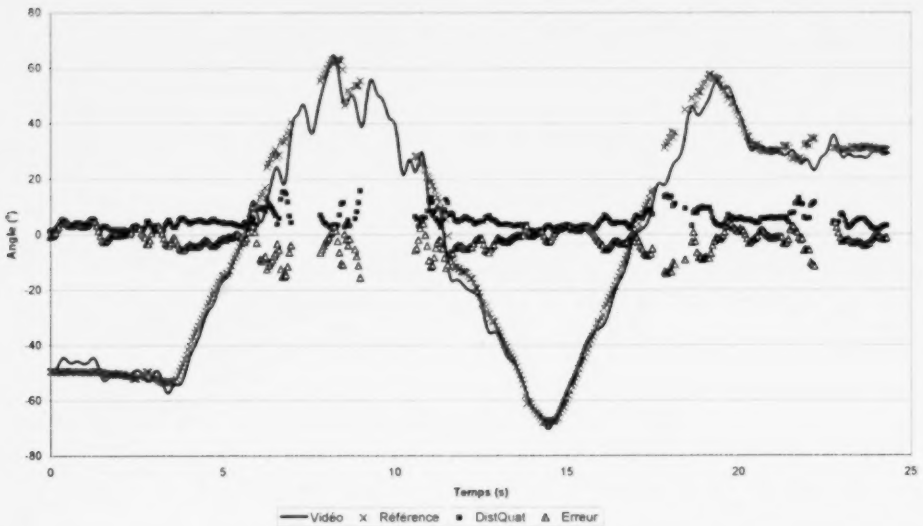


Figure 13 Angle de flexion/extension au poignet en fonction du temps calculé à partir de la numérisation assistée d'une vue vidéo et à partir de la méthode optoélectronique de référence de même que la distance entre les quaternions et l'erreur. Un angle positif correspond à une extension du poignet.

Une autre caractéristique de l'approche vidéo utilisée pourrait également contribuer à expliquer une plus grande erreur sur les angles du poignet. La main était le segment qui se déplaçait le plus par rapport à la caméra, donc celui qui se déplaçait le plus en profondeur, la base (i.e. l'omoplate) étant immobile. Comme l'erreur de reconstruction 3D était la plus importante en profondeur (i.e. le long de l'axe optique), il est probable qu'un plus grand déplacement dans cette direction entraîne plus d'erreur au niveau des angles.

Cette vérification réalisée avec un système articulé de segments rigides nous a permis d'évaluer la technique dans des conditions idéales. En effet, ce choix nous a permis d'éliminer les difficultés reliées aux mouvements de peau et d'axes de rotation mobiles présentes lors de mesures sur un sujet humain.

8 DISCUSSION GÉNÉRALE

Les résultats de l'étude ont démontré la faisabilité de l'utilisation d'une seule caméra vidéo pour déterminer la position tridimensionnelle d'un ensemble de repères organisé dans l'espace. Le niveau de précision observé sur les angles articulaires (5°) avec cette approche est suffisant pour justifier une utilisation à des fins d'analyse de posture du corps humain de manière tridimensionnelle. Par exemple, cette approche pourrait être adoptée plutôt que l'observation systématique pour caractériser les postures du dos dans des classes de niveau de flexion (e.g. <20°, 20 à 40°, etc.). Kilbom (1994) proposait qu'un niveau d'erreur de 5 à 10° était acceptable pour ce genre d'analyse. Ce type d'information pourrait être très utile comme données d'entrée à des modèles biomécaniques tridimensionnels pour estimer les chargements articulaires. Jusqu'à maintenant, les principaux modèles biomécaniques utilisés (e.g. Chaffin *et al.*, 1999; Neumann *et al.*, 2001; Norman *et al.*, 1998) n'ont aucun moyen d'obtenir la posture tridimensionnelle du corps avec suffisamment de précision pour justifier leur utilisation de manière tridimensionnelle. En comparaison avec le système Optotrak, Neumann et al. (2001) rapportaient un niveau d'erreur de 12° de leur approche vidéo pour estimer la posture du tronc. Cette approche a d'ailleurs été utilisée pour l'évaluation des chargements au dos (Norman et al., 1998).

Les limites de l'approche vidéo ont été bien identifiées. Le calibrage de la caméra vidéo constitue la principale difficulté. Pour le moment, un calibrage à partir de huit points est possible. La difficulté réside dans le fait que la caméra doit être fixe, qu'elle ne peut être utilisée en mode de mise au point automatique, et que le mouvement à l'étude ne doit pas sortir du volume calibré. Une autre difficulté importante de l'approche vidéo se situe dans la construction des corps rigides utilisés, plus particulièrement en ce qui concerne la répartition des repères. Cinq ou six repères préférablement non coplanaires et formant des plans de quatre repères permettent d'obtenir une reconstruction tridimensionnelle suffisamment précise. Évidemment, il est toujours préférable d'avoir le plus de repères possibles sur un corps rigide sans que ceux-ci n'interfèrent trop les uns avec les autres.

Dans la présente étude, une seule technique de reconstruction tridimensionnelle utilisant les onze coefficients du DLT a été utilisée. Il est à noter que dans le cas où nous n'aurions pas à comparer les résultats avec un autre système d'acquisition, seulement sept degrés de liberté seraient requis pour obtenir les coordonnées dans le référentiel de la caméra. Il est possible d'obtenir ces degrés de liberté à partir des coefficients de dilatation (Eian et Poppele, 2002). Un carrelage a été utilisé dans la présente étude pour analyser les propriétés de la caméra. Nous aurions pu trouver la position du point nodal dans le plan image en utilisant une seule image d'un carrelage sur deux plans normaux. Puisque nous avons plusieurs positions du panneau carrelé, les données actuelles pourraient être étudiées de nouveau pour corroborer cette technique (présentée à la page 131 du livre de Trucco et Verri, 1998). D'autres techniques de calibrage pourraient également être explorées afin de faciliter l'utilisation de l'approche en situation réelle de travail (Guoqing *et al.*, 1998; Meng et Hu, 2003).

Une contrainte majeure de la technique utilisée est la restriction que la distance focale reste constante. Cette contrainte limite le volume de travail à la région pour laquelle la mise au point a été faite lors du calibrage de la caméra. Or, la technique utilisée par la NASA qui utilise un corps

solide ayant la forme d'un tétraèdre (Abidi et Chandra, 1995), fonctionne avec une caméra dans un mode autofocus. C'est une approche qui pourrait être avantageuse et qui mériterait une étude plus approfondie.

Tout au long de ce projet, une interface de numérisation et d'édition a été élaborée. Cette interface a été conçue de façon à permettre son utilisation dans des contextes variés. En plus de permettre une numérisation accélérée des repères pour déterminer leurs coordonnées tridimensionnelles, il est prévu que l'interface puisse fournir une multitude d'information tant sur la position individuelle de chaque repère placé sur un ou plusieurs objets (corps rigides, ou segment corporel), que sur le modèle utilisé (centres articulaires, centres de gravité). Il sera également possible de représenter les forces externes exercées sur le modèle, d'obtenir les angles articulaires pour les articulations d'intérêt, et les moments nets articulaires. Cette interface deviendra un outil essentiel à l'étude biomécanique de tâches de travail que ce soit à partir de caméras vidéo ou d'un système optoélectronique.

9 CONCLUSION

Cette étude a démontré la faisabilité de l'utilisation d'une seule caméra vidéo pour déterminer la position tridimensionnelle d'un ensemble de repères organisés. Le niveau de précision observé sur les angles articulaires avec cette approche est suffisant pour justifier une utilisation à des fins d'analyse de posture du corps humain de manière tridimensionnelle. Cette méthode est prometteuse pour l'étude tridimensionnelle des mouvements humains dans des situations de travail variées. De plus, une interface de numérisation et d'édition des coordonnées de repères a été mise à l'essai et s'est révélée très efficace à réduire le temps de numérisation et à prédire la position de repères manquants. Toutes ces techniques pourront être utilisées dans un avenir prochain pour étudier les risques de blessures au dos lors de tâches de travail réelles.

10 RÉFÉRENCES

Ababsa, F., Roussel, D., Mallem, M., et Didier, J.Y. (2002) 2D/3D automatic matching technique for 3D recovering of free form objects. *Proceedings of the 16th International conference on Pattern Recognition, 11-15 Aug.2002* 430-433.

Abdel-Aziz, Y.I. et Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry* 1-18.

Abidi, M.A. et Chandra, T. (1995) A New Efficient and Direct Solution for Pose Estimation Using Quadrangular Targets: Algorithm and Evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **17,** 534-538.

Alter, T.D. (1992) 3D Pose from 3 Corresponding Points under Weak-Perspective Projection. Rapport technique No. 1378. Massachusetts Institute of Technology.

Ambrosio, J., Abrantes, J., et Lopes, G. (2001a) Spatial reconstruction of human motion by means of a single camera and a biomechanical model. *Human Movement Science* **20,** 829-851.

Ambrosio, J., Lopes, G., Costa, J., et Abrantes, J. (2001b) Spatial reconstruction of the human motion based on images of a single camera. *Journal of Biomechanics* **34,** 1217-1221.

Carceroni, R.L. et Brown, C.M. (1997a) Numerical methods for model-based pose recovery. Technical report 659, 1997. Rapport technique. University of Rochester, Computer Science Department, New York. Ref Type: Report

Carceroni, R.L. et Brown, C.M. (1997b) Decoupling Orientation Recovery from Position Recovery with 3D-2D Point Correspondences. Rapport technique. Computer Science Department, University of Rochester, New York.

Chaffin, D.B., Andersson, G.B.J., et Martin, B.J. (1999) *Occupational Biomechanics*. Wiley-Interscience, New York.

DeMenthon, D. et Davis, L.S. (1992) Exact and approximate solutions of the perspective-three-point problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14,** 1100-1105.

Desjardins, P., Plamondon, A., Nadeau, S., et Delisle, A. (2002) Handling missing marker coordinates in 3D analysis. *Medical Engineering & Physics* **24,** 437-440.

Eian, J. et Poppele, R.E. (2002) A single-camera method for three-dimensional video imaging. *Journal of Neuroscience Methods* **120,** 65-83.

Fichler, M.A. et Bolles, R.C. (1981) Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the Association for Computing Machinery* ***24****, 381-395.*

Fu, K. S., Gonzales, R.C., et Lee, C.S.G. (1987) *Robotics: Control Sensing, Vision and Intelligence*. McGraw-Hill, New York.

Guoqing, Z., Ethrog, U., Wenhao, F., et Baozong, Y. (1998) CCD camera calibration based on natural landmarks. *Pattern Recognition* **31,** 1715-1724.

Haralick, R.M., Lee, D., Ottenburg, K., et Nolle, M. (1991) Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '91, 3-6 June 1991* 592-598.

Hsiao, H., Stanevich, R., Pizatella, T., Snyder, K., et Halperin, W. (1997) New NIOSH programs for preventing occupational traumatic injury. *International Journal of Industrial Ergonomics* **20,** 501-508.

Hu, Z. Y. et Wu, F. C. (2002) A note on the number of solutions of the noncoplanar P4P problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **24**, 550-555.

Kilbom, A. (1994) Assessment of physical exposure in relation to work-related musculoskeletal disorders - what information can be obtained from systematic observations? *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 20 (S):30-45.

Kuiper, J.I., Burdorf, A., Verbeek, J.H.A.M., Frings-Dresen, M., Van der Beek, A.J., et Viikari-Juntura, E.R.A. (1999) Epidemiologic evidence on manual materials handling as risk factors for back disorders. A systematic review. *International Journal of Industrial Ergonomics* **24,** 389-404.

Kuipers, J.B. (2002) *Quaternions and Rotation Sequences*. Princeton University Press, Princeton.

Kwon, Y.-H. Kwon3D Motion analysis Web. Internet WWW page, at URL: <http://www.kwon3d.com/index.html>. 1998. Ref Type: Unpublished Work

Li, G. et Buckle, P. (1999) Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. *Ergonomics* **42,** 674-695.

Linnainmaa, S., Harwood, D., et Davis, L.S. (1988) Pose determination of a three-dimensional object using triangle pairs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10,** 634-647.

Lowe, D.G. (1987) Three-dimensional object recognition from single two-dimensional images. *Artificial Intelligence* **31,** 355-395.

Mallem, M., Shaheen, M., et Chavand, F. (1999) Automatic camera calibration based on robot calibration. *Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/99, 24-26 May 1999* **Vol. 2,** 1278-1282.

Marzan, G.T. (1976) Rational design for close-range photogrammetry. Doctoral dissertation University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Meng, X. et Hu, Z. (2003) A new easy camera calibration technique based on circular points*1. *Pattern Recognition* **36,** 1155-1164.

Miller, N.R., Shapiro, R., et McLaughlin, T.M. (1980) A technique for obtaining spatial kinematic parameters of segments of biomechanical systems from cinematographic data. *Journal of Biomechanics* **13,** 535-547.

N'Zi, E.C., Mallem, M., et Chavand, F. (1995) Method for updating the environment's 3D geometric database in telerobotics by determining the 3D attitude of a known object from a single camera view. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics: Intelligent Systems for the 21st Century, 22-25 Oct.1995* **Vol. 5,** 4059-4064.

Neumann, W.P., Wells, R., Norman, R., Kerr, M., Frank, J., Shannon, H., et OUBPS Working Group (2001) Trunk posture: reliability, accuracy, and risk estimates for low back pain from a video based assessment method. *International Journal of Industrial Ergonomics* **28,** 355-365.

Norman, R., Wells, R., Neumann, P., Frank, J., Shannon, H., Kerr, M., et Ontario Universities Back Pain Study (OUBPS) Group (1998) A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors for the reporting of low back pain in the automotive industry. *Clinical Biomechanics* **13,** 561-573.

Pampagnin, L.H. et Devy, M. (1991) 3D object identification based on matchings between a single image and a model. *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, April 1991* 1580-1587.

Quan, L. et Lan, Z. (1999) Linear N-Point Camera Pose Determination. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **21,** 1-7.

Triboulet, J., Shaheen, M., Mallem, M., Fioroni, C., et Passemard, J.R. (2001) Finding 3D polyhedral object attitude using a virtual model for industrial machining. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 15-18 Oct.2001* 57-65.

Trucco, E. et Verri, A. (1998) *Introductory techniques for 3-D computer vision.* Prentice-Hall, Upper Saddle River, Etats-Unis.

Ude, A. (1999) Filtering in a unit quaternion space for model-based object tracking. *Robotics and Autonomous Systems* **28,** 163-172.

Wilczkowiak, M., Boyer, E., et Sturm, P. (2001) Camera calibration and 3D reconstruction from single images using parallelepipeds. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2001, 7-14 July 2001* **1,** 142-148.